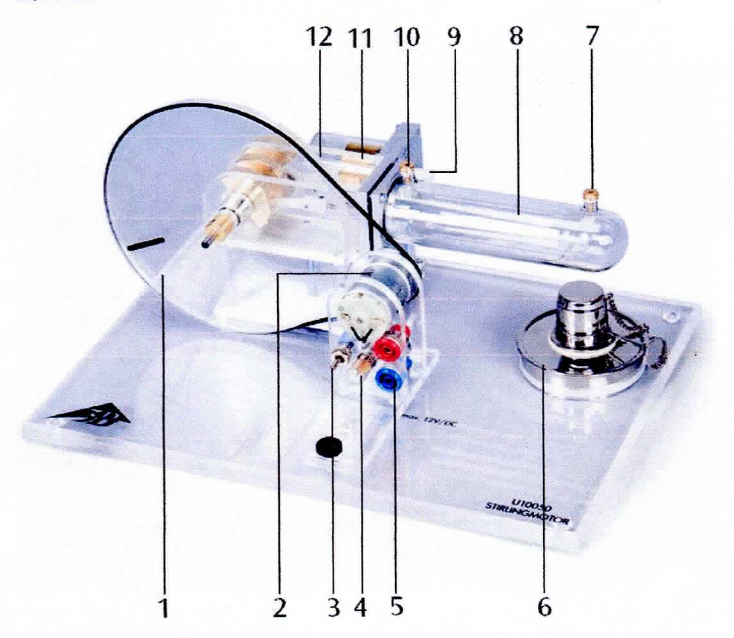
3B SCIENTIFIC® PHYSICS



Moteur Stirling G U10050

Instructions d'utilisation

02/11 ALF



1 Roue volante avec repère pour déterminer la vitesse
2 Unité moteur – générateur avec poulie à deux étages
3 Interrupteurs
4 Ampoule
5 Douilles de sécurité de 4 mm
6 Brûleur à alcool
7 Support de mesure de température 1
8 Piston déplaceur
9 Raccord de tuyau avec chape pour mesures de pression
10 Support de mesure de température 2
11 Piston de travail
12 Tige filetée M3 (reliée au piston de travail)

1. Consignes de sécurité

- Remplir avec précaution l'alcool dénaturé dans le brûleur ; veiller à ne pas en renverser.
- Ne jamais remplir le brûleur à alcool tant que la mèche répand encore une faible lueur ou qu'une autre flamme directe est allumée à proximité.
- Après son emploi, refermer immédiatement la bouteille d'alcool.
- Ne pas mettre la main dans la flamme.
- Prudence ! Eteindre la flamme uniquement lorsque le couvercle est fixé.

Le moteur Stirling se réchauffe en cas de fonctionnement avec une flamme nue.

- Pendant et après l'exploitation du moteur Sterling, ne pas toucher le cylindre refouleur.
- Avant de le ranger, laissez refroidir le moteur Stirling.

2. Description

Le moteur Stirling permet l'étude qualitative et quantitative du cycle de Stirling. Il peut être exploité en trois modes différents : comme moteur thermique, comme thermopompe et comme machine frigorifique.

Le cylindre et le piston refouleurs sont constitués en verre thermorésistant, le cylindre de travail, la roue volante et les protections de l'engrenage en verre acrylique. Ainsi les différentes phases des mouvements peuvent-elles à tout moment être très bien observées. Les vilebrequins en acier durci sont montés sur billes. Les bielles sont en plastique inusable.

L'unité intégrée du moteur – générateur avec poulie à deux étages permet de transformer l'énergie mécanique générée en énergie électrique. Avec possibilité de commutation pour exploiter une lampe intégrée ainsi que pour appliquer des charges externes ou alimenter l'énergie électrique pour l'emploi comme pompe thermique ou machine frigorifique.

Mesurez la course du piston de travail en fixant le fil fourni à la tige filetée du piston.

3. Caractéristiques techniques

Unité moteur–générateur :	max. 12 V CC
Poulie à deux étages :	Ø 30 mm, Ø 19 mm
Piston de travail :	Ø 25 mm
Course piston de travail :	24 mm
Modification de volume :24 mm $\left(\frac{25\,\text{mm}}{2}\right)\cdot\pi = 12\ \text{cm}^3$	
Volume minimum :	32 cm³
Volume maximum :	44 cm³
Puissance du moteur Stirling :	env. 1 W
Dimensions :	env. 300x220x160 mm³
Masse :	env. 1,65 kg

4. Schéma du principe de fonctionnement

Le processus Stirling idéal comprend 4 phases (voir fig. 1) :

1ère phase :	Phase d'expansion : modification d'état isothermique, l'air se détend à température constante
2e phase :	Modification d'état isochore, l'air refroidit à volume constant dans le régénérateur
3e phase :	Phase de compression : modification d'état isothermique, l'air est comprime isothermiquement
4e phase :	Modification d'état isochore, l'air est de nou veau réchauffé dans le régénérateur à la température initiale

Dans le moteur Stirling, le processus idéal n'est pas totalement réalisé car les 4 phases se chevauchent. Pendant l'expansion, un échange de gaz chaud à gaz froid se produit et pendant la phase de compression, tout l'air comprimé n'est pas encore dans la partie froide du moteur.

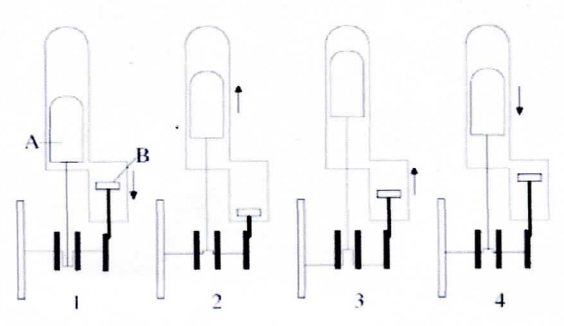


Fig. 1 Schéma du principe de fonctionnement (A: Piston déplaceur, B: Piston de travail)

5. Manipulation

5.1 Le moteur Stirling comme moteur thermique

- Remplissez le brûleur à alcool, placez-le dans l'évidemment de la plaque d'assise, dégagez la mèche sur environ 1 à 2 mm, puis allumez cette dernière.
- Placez le piston de refoulement en butée arrière et, après un bref temps de réchauffement (environ 1 à 2 minutes), mettez la roue volante en mouvement en la poussant légèrement dans le sens des aiguilles d'une montre (vu de l'unité du générateur à moteur) (voir fig. 2).
- Le cas échéant, réglez la tension de la courroie d'entraînement en déplaçant l'unité du générateur à moteur.
- Allumez l'ampoule en réglant l'interrupteur en position supérieure.
- Comme variante, branchez une charge externe via la borne de 4 mm et réglez l'interrupteur en position inférieure.

Vitesse sans charge :	env. 1 000 t/min
Vitesse avec générateur comme charge :	env. 600 t/min
Tension du générateur :	env. 6 V CC
Pression différentielle :	+250 hPa/-150 hPa

5.2 Le moteur Stirling comme thermopompe ou machine frigorifique

Autres équipements requis :

Alimentation CC 15 V, 1,5 A	U8521121-230
ou	
Alimentation CC 15 V, 1,5 A	U8521121-115
Thermomètre numérique	U11818

- Placez les sondes de température dans les tubulures de mesure et branchez-les à un instrument de mesure (voir fig. 3).
- Branchez la source de courant continu via les bornes de 4 mm.
- Réglez max. 12 V et activez le moteur Stirling en réglant l'interrupteur en position inférieure.
- Observez l'augmentation / réduction de température.

Lorsque le moteur fait office de machine frigorifique, la roue volante tourne dans le sens des aiguilles d'une montre (vu de l'unité du générateur à moteur), s'il fonctionne comme une pompe thermique, la roue tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

- Pour changer de mode, inversez la polarité des câbles de connexion.

Pression différentielle :	+250 hPa/-150 hPa
Tension de moteur :	9 V
Vitesse de rotation :	600 t/min

Ecart de température (rel. à 21° C)

Machine frigorifique :	-4 K (réservoir : +6 K)
Thermopompe :	+13 K (réservoir : -1 K)

5.3 Représentation du diagramme de pression-volume du moteur Stirling utilisé comme pompe à chaleur.

Autres équipements requis :

Alimentation CC 15 V, 1,5 A	U8521121-230
ou	
Alimentation CC 15 V, 1,5 A	U8521121-115
3B NET*log*™	U11300-230
ou	
3B NET*log*™	U11300-115
3B NET*lab*™	U11310
Capteur de pression relative ±1000 hPa	U11322
Capteur de déplacement	U11371
Support de capteurs pour moteur Stirling G	U11372

- Fixer le support de capteurs sur le socle du moteur Stirling.
- Placer le capteur de pression relative en bas et le capteur de déplacement en haut du support de capteurs, la partie imprimée orientée vers le haut.
- Raccorder le côté "+" du tuyau flexible du capteur de pression relative et le tuyau flexible au cylindre du moteur Stirling à l'aide du tuyau flexible fourni avec le support de capteurs (U11372) (cf. fig. 4).
- Visser l'écrou borgne attaché au fil (fourni avec le support de capteurs) sur la tige filetée du piston de travail, entourer le fil autour de la poulie du capteur de déplacement et accrocher le ressort cylindrique à la tige filetée. (Pour obtenir une description détaillée du montage des capteurs sur le support de capteurs, reportez-vous au mode d'emploi du support de capteurs U11372.)
- Raccorder le capteur de pression sur l'entrée analogique A et le capteur de déplacement sur l'entrée analogique B du 3B NET*log*™ .
- Brancher la source de courant continu via les bornes de 4 mm.
- Régler max. 12 V et activez le moteur Stirling en réglant l'interrupteur en position inférieure.
- Lancer le logiciel 3B NET*lab*™, appeler l'expérience "Moteur Stirling G“ et tracer le diagramme de pression-volume.

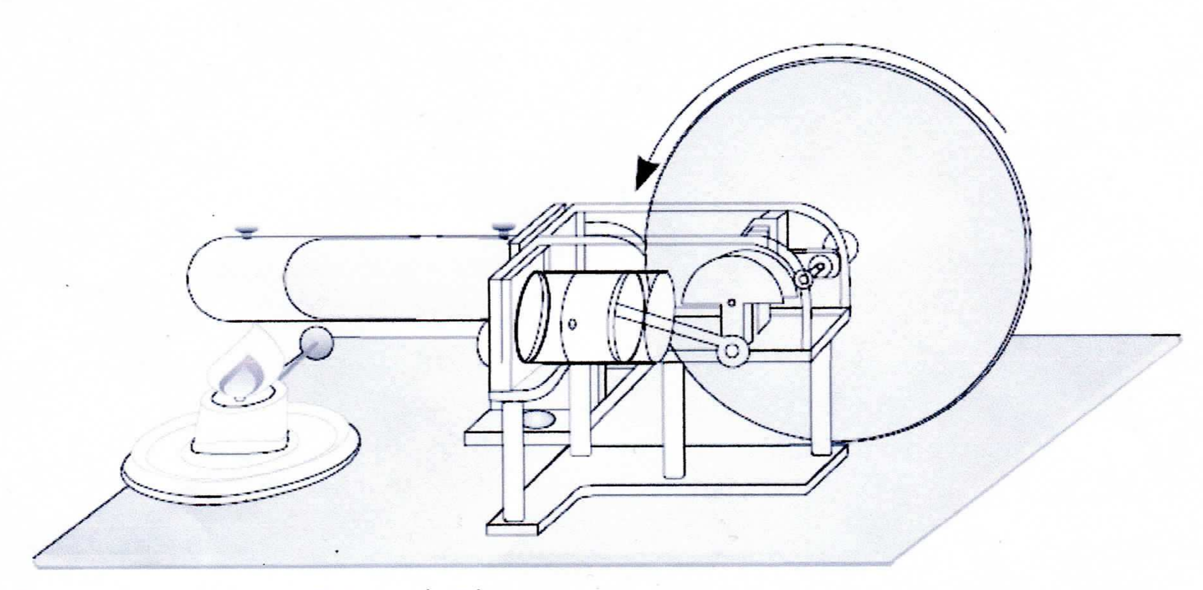


Fig.2 Le moteur Stirling comme moteur thermi-que

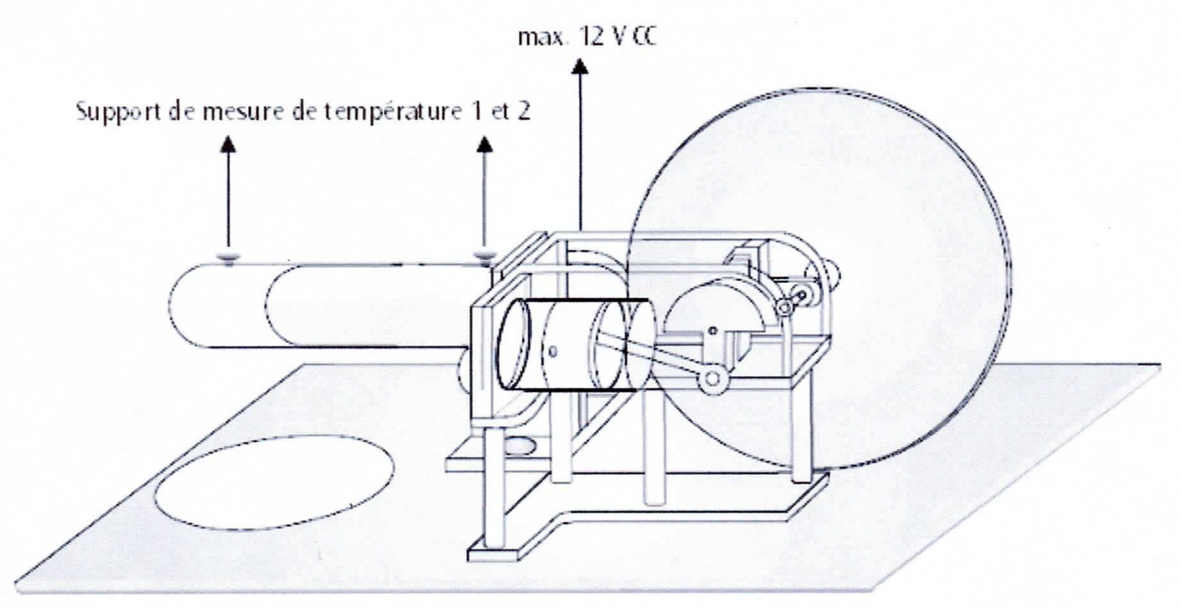


Fig. 3 Le moteur Stirling comme thermopompe ou machine frigorifique

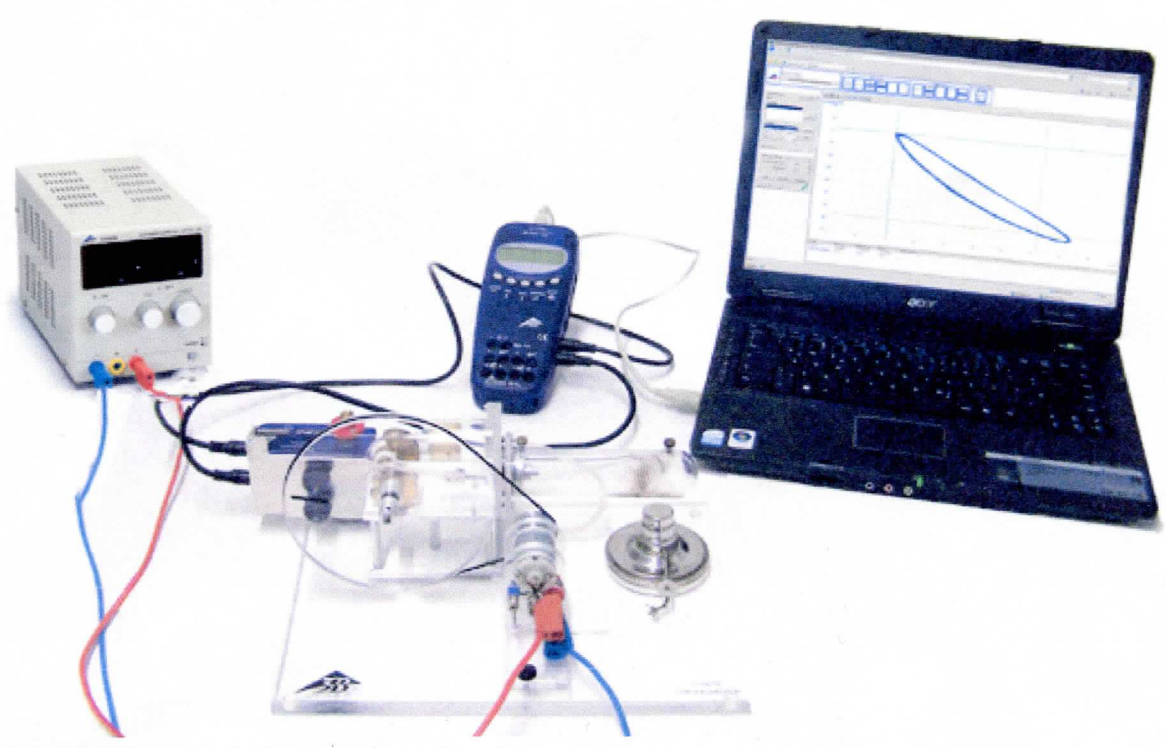
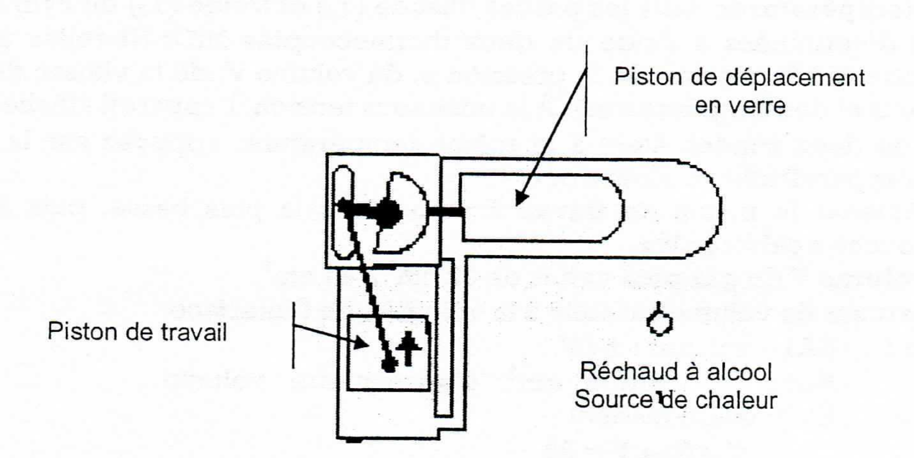
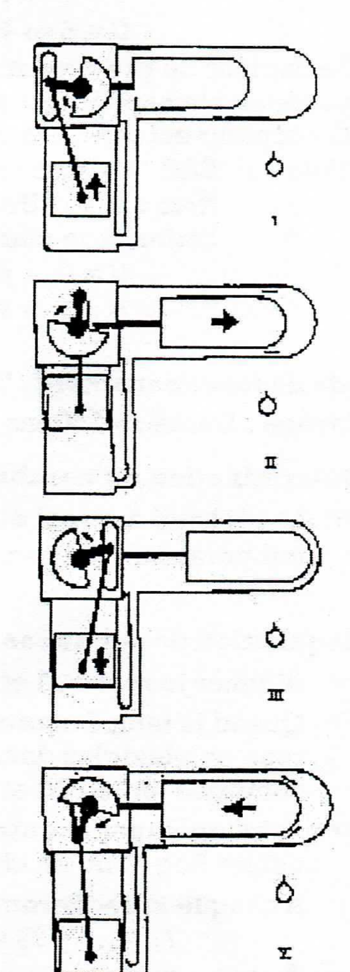


Fig. 4 Enregistrement du diagramme de pression-volume

MOTEUR DE STIRLING

Ce moteur a été inventé en 1816 et a fonctionné pour la première fois en 1818. Son avantage réside dans sa structure fermée et son fonctionnement à combustion externe où tous les combustibles peuvent être utilisés. Dans ce moteur, le piston de travail comprime l'air et le piston de déplacement permet de déplacer le gaz à l'intérieur du cylindre.





Le but de la manipulation est de déterminer le rendement de ce moteur.

1. Description du cycle

Le cycle se décompose en 4 étapes :

I - Détente isotherme à la température T_1

$(p_1, V_1, T_1) \rightarrow (p_2, V_2, T_1)$

L'air se dilate sous l'effet de la chaleur reçue par la source chaude et repousse le piston de travail vers la haut, alors que le piston de déplacement reste immobile.

II - Refroidissement isochore au volume V_2

$(p_2, V_2, T_1) \rightarrow (p_3, V_2, T_2)$

Le piston de déplacement chasse l'air de la zone située au-dessus de la flamme. L'air se refroidit de manière isochore.

III – Compression isotherme à la température T_2

$(p_3, V_2, T_2) \rightarrow (p_4, V_1, T_2)$

L'air est comprimé par le piston de travail de façon isotherme car le piston de déplacement reste immobile.

IV – Échauffement isochore au volume V_1

$(p_4, V_1, T_2) \rightarrow (p_1, V_1, T_1)$

Le piston de déplacement déplace l'air vers la zone située au dessus de la source de chaleur, alors que le piston de travail reste immobile.



2. Étude pratique

♦ **Préparation de l'acquisition des données**

a- La source de chaleur est un réchaud à alcool :
Pouvoir calorifique de l'alcool : $K = 25\ kJ.g^{-1}$
La quantité d'alcool brûlé au cours de l'expérience est déterminée en pesant le réchaud avant et après l'expérience et en ayant pris soin de noter la durée totale de combustion (environ 15 minutes).
- ☞ Remplir le réservoir du réchaud et vérifier que la longueur de la partie émergée de la mèche ne dépasse pas de plus de1 mm.
- ☞ Peser le réchaud, mais ne pas l'allumer tout de suite.

b- Les **températures** dans les parties chaude (T_1) et froide (T_2) du cylindre de détente sont déterminées à l'aide de deux thermocouples NiCr-Ni reliés à l'appareil de mesure PVNT (mesure de la pression p, du volume V, de la vitesse de rotation N du moteur et des températures). À la mise sous tension, l'appareil affiche « CAL ».
- ☞ Les deux sondes étant à la même température, appuyez sur la touche « ΔT ». L'appareil affiche alors « ot ».
- ☞ Amener le piston de travail à sa position la plus basse, puis appuyez sur la touche « calibrer V ».

c- Le **volume** V du gaz peut varier de 32 cm^3 à 44 cm^3.
Le capteur de volume est relié à la voie EA1 de l'interface.
Voie 1 : EA1 calibre : ± 5V
Nom : V Unité : cm^3 Commentaire : volume
Étalonnage manuel :
$U = 0 \rightarrow V = 32$
$U = 5 \rightarrow V = 44$

d- Le capteur de pression mesure la différence de pression Δp par rapport à la pression atmosphérique p_a.
Ce capteur est relié à la voie EA0 de l'interface.
Voie 2 : EA0 calibre : ± 5V
Nom : p Unité : Pa Commentaire : pression
Étalonnage manuel :
$U = 0 \rightarrow p = +70\ 000$
$U = 5 \rightarrow V = +219\ 000$

Mode de fonctionnement : Temporel, ***Abscisse :*** V
Balayage : Durée : ≈ 250 ms avec ≈192 points de mesure

♦ **Détermination du nombre n de moles de gaz contenu dans le cylindre.**
- ☞ Le réchaud à alcool étant éteint, relever le volume V, la pression p et la température T du gaz. En appliquant la loi des gaz parfaits, en déduire n ($\approx 1,3.10^{-3}$ mol).

♦ **Acquisition des données :**
- ☞ Allumer le réchaud et noter l'heure.
- ☞ Quand la température T_1 atteint environ 90°C, lancer le moteur en tournant la roue en plexiglas dans le sens des aiguilles d'une montre. La vitesse doit être comprise entre 500 et 1000 tours par minute.
- ☞ Faire quelques acquisitions enregistrées sur les pages différentes du même fichier Reg-Win, en choisissant des vitesses de rotation différentes.
A chaque enregistrement noter comme paramètres expérimentaux :
$T_1 = \ldots$ $T_2 = \ldots$ $N = \ldots$ (vitesse de rotation du moteur)
- ☞ Éteindre le réchaud au bout de 15 minutes environ et noter l'heure et vous le repeserez pour connaître la consommation d'alcool.

☞ Déduire la chaleur libérée par le réchaud par unité de temps.

3. Exploitation des résultats

Sauvez les acquisitions réalisées.

3.1. *Visualisation du cycle de Clapeyron*

☞ Observer $p = f(V)$.

☞ Décrire la forme du cycle obtenu.

3.2. *Superposition des isothermes théoriques*

Pour comparer avec le cycle théorique, vous allez superposer les deux isothermes théoriques.

☞ Créer les nouvelles Grandeurs Calculées :

$p_1 = nRT_1 / V$ isotherme théorique à la température T_1(en K)

$p_2 = nRT_2 / V$ isotherme théorique à la température T_2

NB : la quantité de matière *n*i et la constante des gaz parfaits *R* peuvent être considérée comme des paramètres expérimentaux de même valeur pour chaque page. Il convient donc de créer ces paramètres pour manipuler des expressions littérales.

☞ Imprimer ce graphe et rejoindre les isothermes pour figurer les isochores : c'est le cycle théorique.

☞ Que constatez-vous ?

☞ Pourquoi ?

3.3. *Le cycle théorique*

☞ En prenant les valeurs expérimentales de volume et de température, déterminer, au cours de chaque étape, les quantités de chaleur Q_i et les travaux W_i échangés par le gaz supposé parfait avec le milieu extérieur ($C_{v,m} = 5R/2$)

☞ En déduire le rendement théorique de ce cycle : $\eta = W_{total} / Q_{\text{échangée avec la source chaude}}$

3.4. *Détermination du travail effectué au cours du cycle réel*

☞ Créer la nouvelle Grandeur, Intégrale :

W unité : J

W représente le travail effectué par le moteur pendant le temps de l'acquisition : $W = -\int p\,dV$

☞ Visualiser : $W = f(t)$.

☞ A partir de ces graphes, évaluer le travail *W* effectué par le moteur au cours d'un cycle.

☞ Quelle a été votre façon de procéder ?

☞ Déterminer graphiquement la durée d'un cycle.

☞ Vérifier votre résultat par la connaissance du nombre de tours *N* effectuées par minute.

☞ Comparer la valeur expérimentale à la valeur évaluée à l'aide du cycle théorique.

☞ Déterminer la puissance *P* du moteur.

3.5. *Détermination du rendement*

☞ Calculer la quantité de chaleur *Q* fournie par la source chaude pendant la durée d'un cycle.

$$\eta = \frac{\text{Travail total } W_{total} \text{ fourni pendant un cycle}}{\text{Quantité de chaleur } Q_c \text{ fournie par le réchaud pendant un cycle}}$$

☞ Comparer ce rendement au rendement théorique du cycle.

- Comparer votre résultat expérimental à celui d'une machine fonctionnant suivant un cycle idéal réversible de type Carnot : $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$
- Justifier les différences.

4 Caractéristiques techniques

Fonctionnement en moteur thermique :
Vitesse de rotation : env. 600 trs/min
Tension de la génératrice : env. 6 V (CC)
Différence de pression : + 250 hPa / - 150 hPa

Fonctionnement en pompe à chaleur ou machine frigorifique :
Différence de pression : + 250 / - 150 hPa
Tension du moteur : 9 V
Vitesse de rotation : 600 trs/min
Différence de température (par rapport à 21 °C) :
Machine frigorifique : - 4 K (réservoir : + 6 K)
Pompe à chaleur : + 13 K (réservoir : - 1 K)

Caractéristiques générales :
Volume total : env. 35 ml
Changement de volume : env. 10 ml
Course du piston de travail : 23 mm
Dimensions : 300 mm x 220 mm x 160 mm

TRAVAUX PRATIQUES DE THERMODYNAMIQUE

MACHINE DE STIRLING

But du TP : étudier une machine thermique (moteur ou récepteur) basée sur le cycle de Stirling; un TP utilisant une interface, permet une étude approfondie du fonctionnement de la machine, en application des principes de la Thermodynamique : *2 premiers principes, cycle réversible, isochores et isothermes, rendement, conversion de chaleur.*

La maquette, réalisée par Elwe-Leybold, permet l'étude expérimentale de cette machine de Stirling.

Le TP permet d'étudier le récepteur thermique (réfrigérateur ou pompe à chaleur) en première partie et le moteur thermique en deuxième partie; cette machine est donc "réversible".

I Récepteur thermique

1) Cycle de Stirling (théorique)

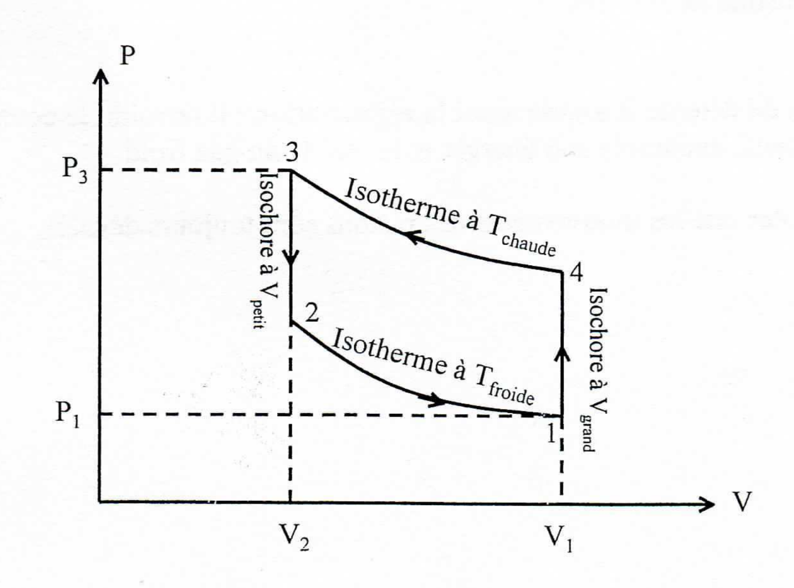
Principe du Cycle :
Le principe est de comprimer un fluide pour qu'il s'échauffe.

La particularité du cycle théorique de Stirling est d'avoir dans le cycle à quatre étapes, deux étapes à volume constant et deux étapes à température constante.

Les 4 temps :

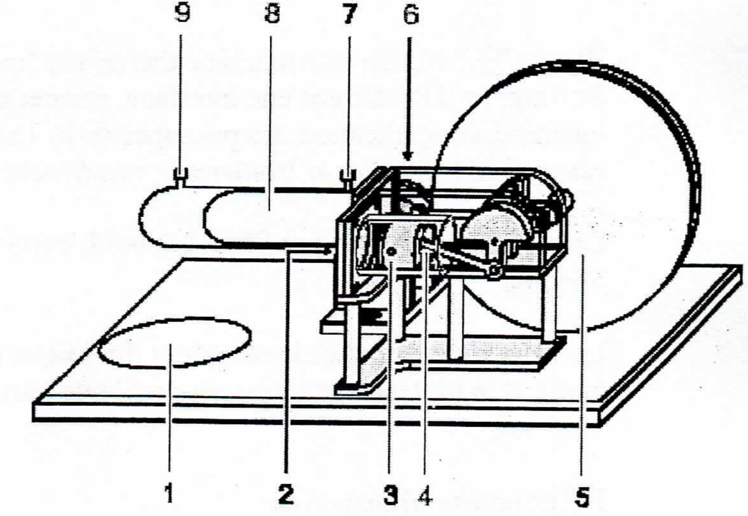
- 1er temps : échauffement isochore de l'état 1 à l'état 4.
- 2ème temps : compression isotherme (T_{chaude}) de l'état 4 à l'état 3.
- 3ème temps : refroidissement isochore de l'état 3 à l'état 2.
- 4ème temps : détente isotherme (T_{froide}) de l'état 2 à l'état 1.

Diagramme PV du Cycle **idéal** :



2) Schéma du dispositif expérimental

Un petit moteur électrique relié au volant apporte le travail nécessaire au récepteur thermique.



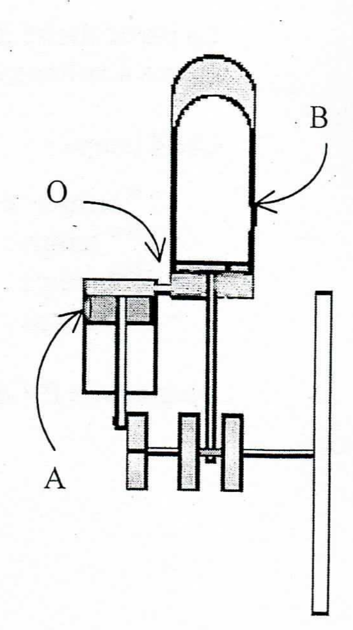
1 Bac, pour l'alcool à brûler (inutilisé au I)
2 Raccord pour la mesure de la pression
3 Piston de travail (ou piston moteur)
4 Tige filetée (reliée au piston de travail)
5 Volant
6 petit moteur électrique
7 Point de mesure 2 de la température (réservoir)
8 Piston de refoulement
9 Point de mesure 1 de la température

Matériel non représenté : 1 générateur

3) Principe de fonctionnement

La particularité pratique de la machine de Stirling est d'utiliser un piston de refoulement ("déplaceur") en plus du piston qui fourni le travail. Le rôle de ce un piston de refoulement est de séparer la source froide et chaude, il n'est pas obligatoirement relié mécaniquement au piston. Ce piston de refoulement permet le passage du fluide.

La maquette, réalisée par Elwe-Leybold est constituée d'un piston de travail A et d'un piston de refoulement B tous les 2 en verre, placés parallèlement entre eux.

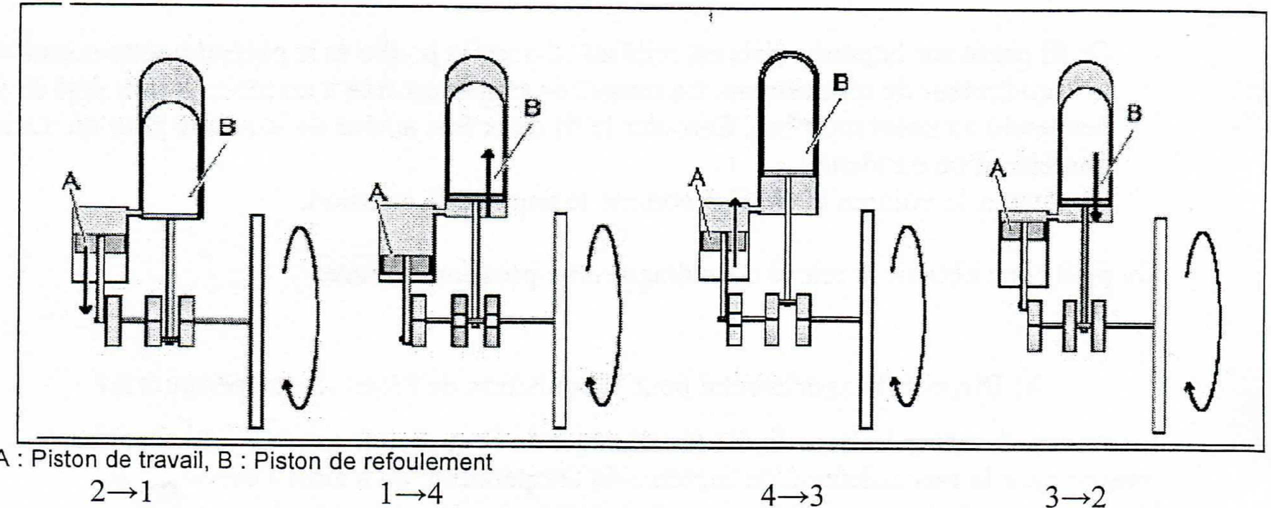


Le système thermodynamique est donc l'air ("machine à air chaud") contenu dans A et à l'extérieur de B (mais toujours dans une enceinte fermée) : l'air circule dans les enceintes (point de passage : O) mais l'ensemble est hermétique.

Le volume d'air dans l'enceinte du piston B est constant alors que celui dans l'enceinte de A varie.

Le piston de détente B assure aussi la régénération : il refroidit le courant de gaz chaud, accumule son énergie et la recède au gaz froid.

Il est à noter que les mouvements des pistons sont toujours décalés.



A : Piston de travail, B : Piston de refoulement

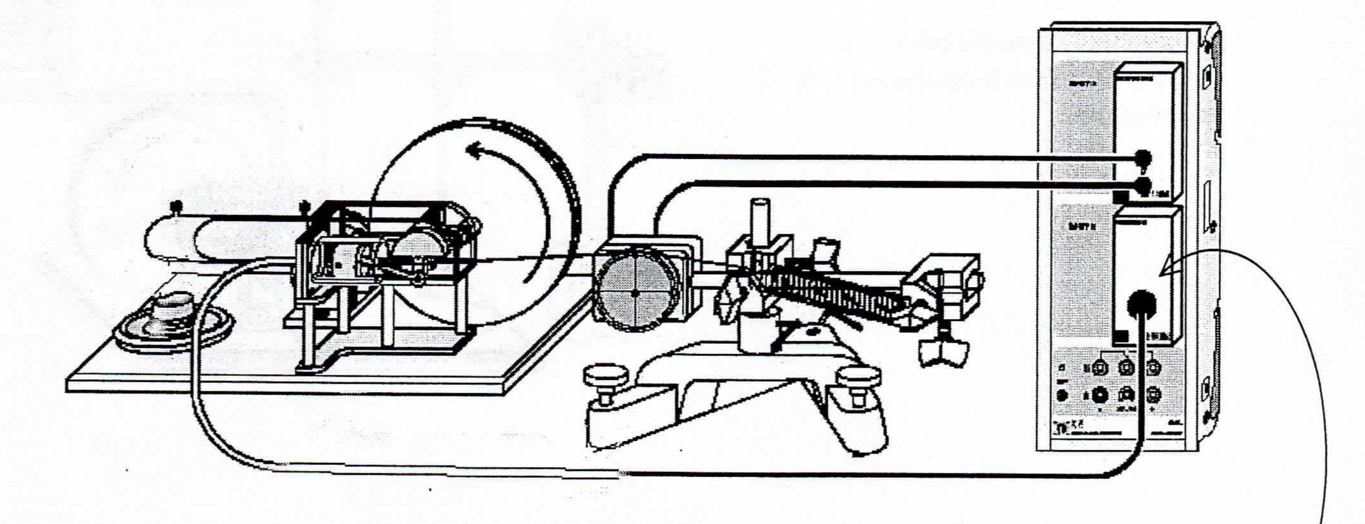
2→1 1→4 4→3 3→2

Le mode de fonctionnement du récepteur est le suivant :

- 1→4 : échauffement isochore de l'état 1 à l'état 4 : apport de chaleur, sans travail.
- 4→3 : compression isotherme (T_{chaude}) de l'état 4 à l'état 3 : cession de chaleur à la source chaude, apport de travail par le mouvement imposé par le petit moteur électrique.
- 3→2 : refroidissement isochore de l'état 3 à l'état 2 : cession de chaleur, sans travail.
- 2→1 : détente isotherme (T_{froide}) de l'état 2 à l'état 1 : apport de chaleur de la source froide, cession de travail.

a) Dispositif expérimental pour l'acquisition du diagramme *pV.*

La poulie du petit moteur électrique entraîne le volant;



Ensemble de capteurs :

- La mesure de la pression : réalisée via un raccord pour tuyau; Un manomètre avec sortie analogique est relié à une entrée de la centrale SP5 ou du boîtier BORA. Un capteur de pression peut être réalisé dans Synchronie, menu Matériel-> capteurs . On créé un nouveau capteur et on l'étalonne..
- La mesure du volume : Potentiomètre 10 tours avec poulie, alimentation tension continue (20 V), ressort de rappel, fixation d'un fil sur le piston pour la mesure du déplacement du piston de travail et donc de la variation de volume.

Ce fil passe sur la poulie puis est relié au ressort; la poulie et le potentiomètre constituent le transducteur de mouvement. Le ressort de rappel est fixé à un pied;. Il doit déjà être un peu tendu au point mort bas. Enrouler le fil deux fois autour de la poulie pour qu'aucun glissement ne survienne.
Le capteur le volume est réalisé comme le capteur de pression.

On peut donc obtenir le relevé d'un diagramme pression-volume.

b) Dispositif expérimental pour l'acquisition de l'écart de température ΔT.

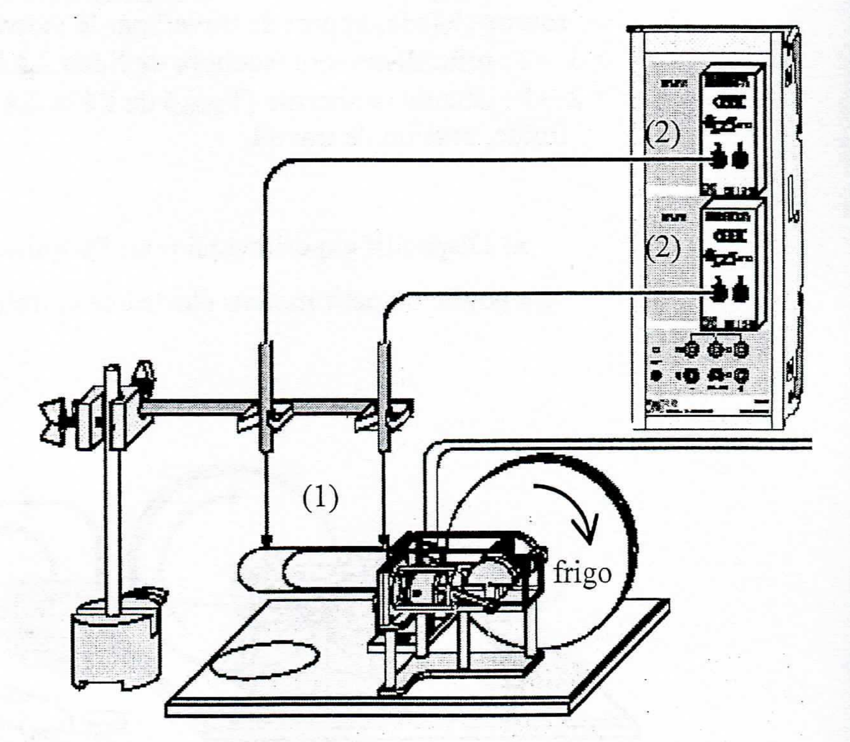
La mesure des températures froide (au dixième de °) et chaude (au °C) : deux points de mesure pour le raccordement de capteurs de température; on a ainsi l'élévation et l'abaissement de la température de part et d'autre du piston de refoulement.

Suivant le sens de rotation, soit comme pompe à chaleur, soit comme machine frigorifique.

Machine frigorifique : Rotation dans le sens horaire *
Pompe à chaleur : Rotation dans le sens trigonométrique*
* vu du côté moteur électrique

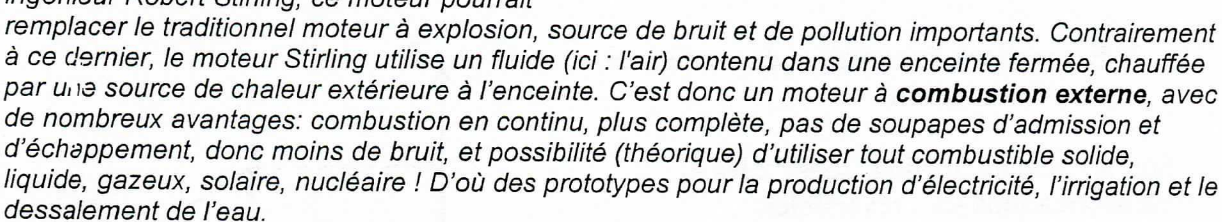
(1) 2 sondes de température NiCr-Ni
(2) 2 adaptateurs température sur le Sensor-CASSY

Le logiciel donne directement la mesure de ΔT ou bien chacune des 2 températures.



II moteur à air chaud

Petite histoire du moteur à air chaud (dit "moteur de Stirling") :

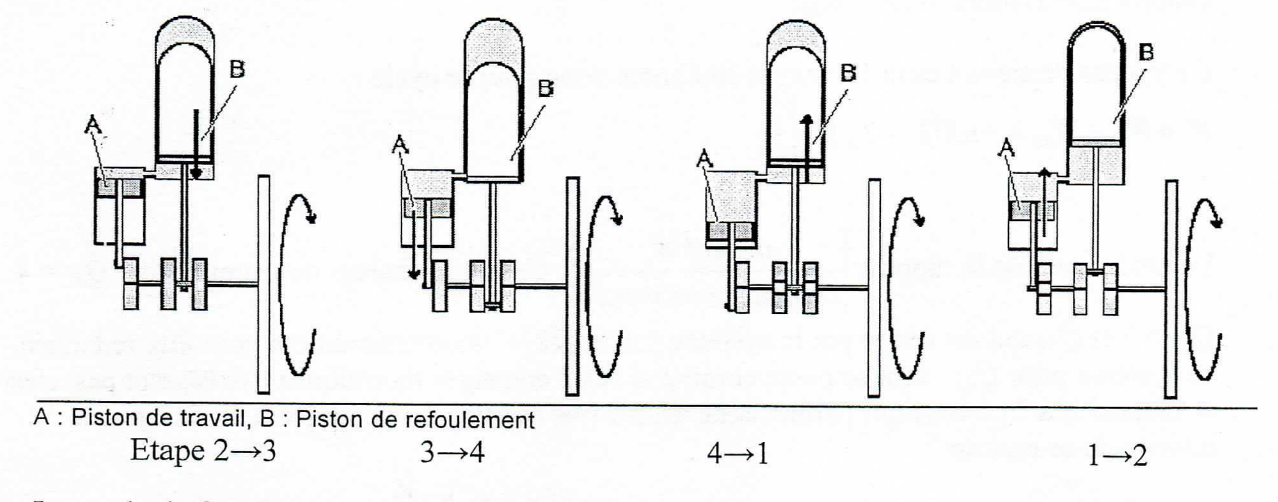


Découvert en 1816 par le pasteur et ingénieur Robert Stirling, ce moteur pourrait remplacer le traditionnel moteur à explosion, source de bruit et de pollution importants. Contrairement à ce dernier, le moteur Stirling utilise un fluide (ici : l'air) contenu dans une enceinte fermée, chauffée par une source de chaleur extérieure à l'enceinte. C'est donc un moteur à ***combustion externe****, avec de nombreux avantages: combustion en continu, plus complète, pas de soupapes d'admission et d'échappement, donc moins de bruit, et possibilité (théorique) d'utiliser tout combustible solide, liquide, gazeux, solaire, nucléaire ! D'où des prototypes pour la production d'électricité, l'irrigation et le dessalement de l'eau.*

Le moteur de Stirling permet la transformation d'énergie thermique en énergie mécanique.

1) Principe de fonctionnement

Le principe est de chauffer un fluide pour qu'il se détende et entraîne un piston pour ensuite le refroidir et revenir aux conditions initiales.
En fonctionnement en moteur thermique, la source d'énergie est externe (brûleur à alcool). Le petit moteur électrique précédent peut servir de génératrice pour la production d'énergie électrique (par ex. pour la connexion d'une lampe).



A : Piston de travail, B : Piston de refoulement

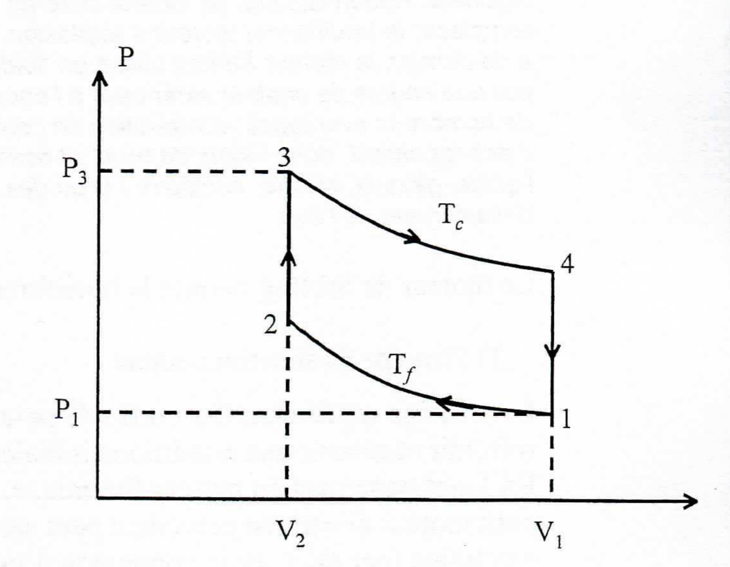
Etape 2→3   3→4   4→1   1→2

Le mode de fonctionnement du moteur est le suivant :

- 2→3 : échauffement isochore (à V_2) de l'état 2 à l'état 3 : apport de chaleur, sans travail. A est à l'arrêt, le volume est minimal; B fait passer le gaz du côté de la source de chaleur où il s'échauffe et fait monter la pression; $Q_{23} > 0$
- 3→4 : détente isotherme (à T_{chaude}) de l'état 3 à l'état 4 : apport de chaleur, cession de travail. La pression élevée pousse A vers le bas, le volume de l'air augmente; et le gaz produit un travail $W_{34} < 0$ avec $|W_{34}| > W_{12}$, $Q_{34} > 0$
- 4→1 : refroidissement isochore (à V_1) de l'état 4 à l'état 1 : cession de chaleur $Q_{41} < 0$, sans travail. L'air est "loin" de la source de chaleur alors il se refroidit; le volume est maximum (dans A); B pousse le gaz dans la chambre froide.
- 1→2 : compression isotherme (à T_{froide}) de l'état 1 à l'état 2 : cession de chaleur, apport de travail. $W_{12} > 0$; A monte; B est à l'arrêt; le gaz qui s'était refroidit dans l'étape précédente, se contracte donc maintenant;
-

	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4
Pression	P_1	P_2	P_3	P_4
Volume	V_1	V_2	V_2	V_1
température	T_f	T_f	T_c	T_c

2) Expressions du travail et du rendement (pour information)



Soit le cycle de Stirling "idéal" : les 4 transformations sont réversibles;

n : nombre de moles d'air

$1\rightarrow2$: $W_{12} = -nRT_f \ln\frac{V_2}{V_1} > 0$

et $Q_{12} = - W_{12}$ donc $Q_{12} < 0$;

$3\rightarrow4$: $W_{34} = -nRT_c \ln\frac{V_1}{V_2}$ et $Q_{34} = - W_{34} > 0$.

comme $T_c > T_f$ alors $|W_{34}| > W_{12}$;

il n'y a pas de travail pour les étapes isochores donc pour le cycle :

$$W = W_{12} + W_{34} = -nR(T_c - T_f)\ln\frac{V_1}{V_2}$$

Le rendement est le rapport $\left|\frac{travail\ W}{chaleur\ consommée}\right|$; Q_{34} est la chaleur consommée car $Q_{41} = -Q_{23} > 0$ et Q_{41} qui est cédée par le système est "stockée" momentanément pour être redonnée au système pour Q_{23} : tout se passe comme si ces 2 échanges thermiques n'existaient pas; c'est ce dispositif à 2 pistons qui permet cette astuce très avantageuse et qui fait un des grands intérêts de ce moteur.

Le rendement est ainsi meilleur : $r = \left|\frac{W}{Q_{34}}\right| = -\frac{-nR(T_c - T_f)\ln\frac{V_1}{V_2}}{nRT_c\ln\frac{V_1}{V_2}}$

donc $\boxed{r = 1 - \frac{T_f}{T_c}}$ rendement d'un cycle de Carnot fonctionnant entre les mêmes isothermes; c'est le rendement maximal, **idéal**.

En réalité le cycle n'est pas réversible donc le rendement est loin d'être maximal.

Le travail donné par le système correspond ainsi à **l'aire délimitée par la courbe**. Dans l'expérience, on trace le diagramme pV du moteur à air chaud en tant que moteur thermique.

La puissance du moteur est donnée par $P = W/\Delta t$ = travail d'un cycle/durée d'un cycle.
Déterminer la puissance du moteur.

c) Comparaison avec la théorie

• Rendement réel :

la consommation d'alcool est de 6,7 mg/s et la production thermique de l'alcool à brûlé est de 25 kJ/g; mais la puissance thermique effectivement reçue par le système est d'environ 10 kJ/g.
en déduire la puissance thermique fournie au moteur $P_{fournie}$;
puis en déduire le rendement réel $r = P/P_{fournie}$

• Rendement idéal :

Mesurer les 2 températures T_1 et T_2; en déduire le rendement théorique (idéal) de Carnot r_c.

• conclure.

6) Moteur "en charge"

On veut utiliser l'énergie mécanique donnée par le moteur : détendre le ressort (ou l'enlever) du capteur de mouvement; mettre la courroie entre la génératrice et le volant; placer une ampoule **dévissée** aux bornes de la génératrice, pendant que le moteur tourne, visser l'ampoule, que se passe-t-il ? dévisser l'ampoule, que se passe-t-il ?

Mesurer la tension à vide (sans ampoule) aux bornes de la génératrice.

CONCLUSION:

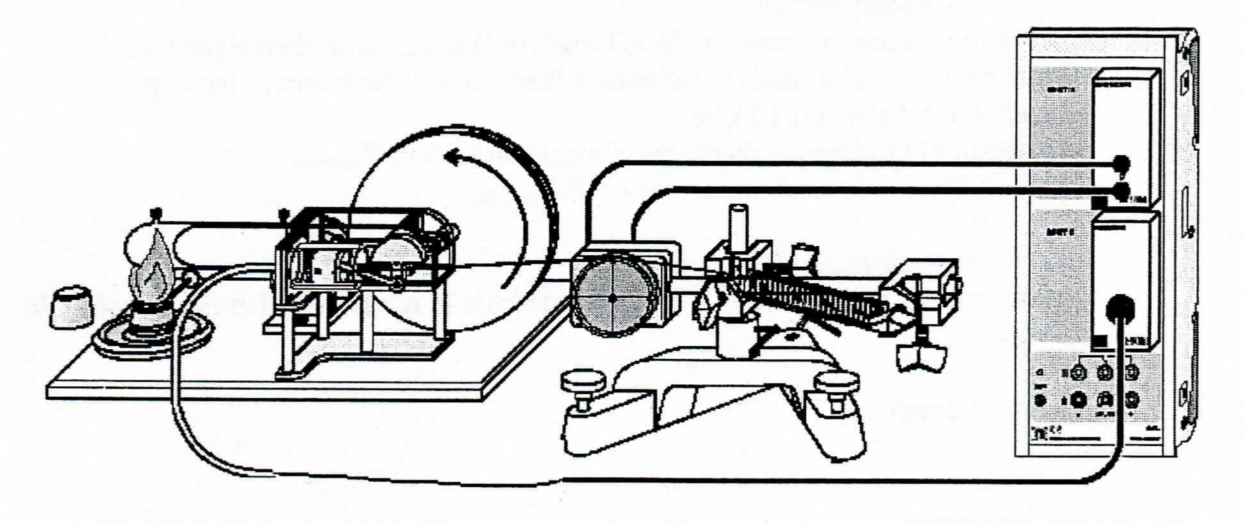
Les essais de moteur Stirling repris depuis plus de 10 ans, mettent en œuvre des matériaux récents, les céramiques, en particulier, hélium ou hydrogène comme fluide, températures élevées (jusqu'à 1400 °C), d'où un rendement supérieur aux moteurs classiques, avec moindre bruit et moindre pollution. Affaire à suivre...

Les applications :

Même si le moteur de Stirling à peu de chance de supplanter le moteur à explosion dans la propulsion des véhicules classiques, il a peut être un avenir dans les véhicules à carburants hybrides et à faible pollution.
Il est déjà utilisé pour la propulsion de sous-marins car il est silencieux et sans vibration.
Il a des applications biomédicales comme cœur artificiel.
Il sert à la production d'électricité comme moteur de groupes électrogène dans des endroits peu accessibles avec comme source de chaleur le soleil ou la biomasse.
Il est aussi utilisé dans un cycle qui n'est plus moteur mais pompe à chaleur ou réfrigérateur. Dans ce cas le travail est fourni et le "moteur" sert à refroidir une source. Le département de chimie du Palais de la découverte est doté d'un moteur de Stirling qui refroidit l'air à une température inférieure à -193°C pour le liquéfier.
Enfin, il est utilisé dans la technologie spatiale comme source de courant, chauffé entre autres par des radio-isotopes.

3) Description du dispositif expérimental pour les mesures

L'extrémité du cylindre de détente est chauffée par un brûleur à alcool.



ensemble de capteurs :
La mesure de la pression et du volume : comme au I
on peut donc obtenir le relevé d'un diagramme pression-volume.
Le logiciel donne directement toutes ces mesures.

4) Marche à suivre

a) Matériel supplémentaire nécessaire: le brûleur à alcool et un voltmètre aux bornes du petit moteur qui sert maintenant de génératrice.

b) Allumer le brûleur; attendre 2 minutes pour que le gaz soit suffisamment chaud pour un démarrage facile; puis lancer le volant moteur dans le sens trigonométrique (vu du côté moteur) : donner au moins 3 poussées.
Enlever la courroie entre le petit moteur et le volant si le moteur ne tourne pas assez vite.

c) Comme au I, enregistrer un cycle; régler éventuellement les distances du systéme potentiomètre, pied et ressort pour le volume, pour améliorer l'enregistrement.

5) Mesures et Exploitation

a) Enregistrer le diagramme *pV*; l'imprimer; déterminer l'aire du cycle.
Comme au I, Le diamètre intérieur du cylindre de travail est de 25 mm, ceci donnant une surface du piston de 4.9cm^2. On obtient alors le volume qu'on évaluera raisonnablement à 11 cm^3.
Le travail par cycle s'obtient à l'aide de **l'aire du cycle** (comme au I).

b) Déterminer la durée Δt d'un cycle en redéfinissant l'abscisse et en augmentant le nombre de points d'enregistrement; Δt est la période de la sinusoïde obtenue.